

贫金属星的表面丰度与慢中子俘获过程

张妙静^{1,2,4} 张波^{1,3,4} 刘继宏^{3,4} 厉光烈^{1,4}

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(广西师范大学物理与电子科学系 桂林 541004)

3(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

4(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 在不依赖于特定恒星模型的前提下,采用参数化热脉冲模型,对三颗铅星的表面丰度进行了拟合计算.结果表明,无论是否考虑分叉道的影响,结果均能很好地重现观测数据.另外,铅星与非铅星的模型参量对比显示,铅星的平均中子辐照量远大于非铅星,而其挖掘程度明显小于非铅星.这说明尽管参数化热脉冲模型过于简单,但对约束恒星模型仍具有重要意义.

关键词 贫金属星 铅星 s 过程 中子辐照量

1 引言

慢中子俘获过程作为元素核合成理论^[1,2]的重要组成部分,为解释自然界重元素的起源提供了有力的理论依据.所谓慢中子俘获过程,是指在较低中子数密度(约为 10^8cm^{-3})的条件下不稳定种子核在俘获中子之前先发生 β 衰变的中子俘获过程,简称 s(slow)过程.它所合成的元素称为 s 元素.位于渐进巨星分支(Asymptotic Giant Branch,简称 AGB)上的恒星,因其光球层中的碳和重核素的丰度不同程度地高出一般恒星,使人们把它们与 s 过程联系起来.其中,中小质量 AGB 星在演化过程中循环发生的、伴随“第三次挖掘”的热脉冲现象使人们意识到它们的富氮中间壳层是发生 s 过程的最合适场所^[3].所谓“第三次挖掘”,是指在 AGB 星发生有限个热脉冲之后,即当其碳-氧核心的质量达到临界值时,恒星的对流外包层在每个热不稳定性熄火时深入到部分的氮燃烧区域,把新合成的 ^4He , ^{12}C 及 s 过程的产物带到外包层表面的机制.“第三次挖掘”使恒星表面丰度与 s 过程核合成产量的比较有了可

靠的理论基础.

在有关恒星表面丰度的研究中,现代标准恒星模型^[4]预言:凡是金属丰度^[1]小于 -1.3 的、富 s 过程的 AGB 星都是铅星.铅星就是具备以下条件的 AGB 星:首先,铅的丰度必须大大超过 s 元素及铁元素的丰度;其次, s 元素大大超丰于铁元素.上述预言最近首次被欧洲南部观测站所证实^[5],他们利用 3.6m 天文望远镜观测到了三颗铅星——HD187861, HD224959 和 HD196944.不过,他们同时也指出:符合模型预言的贫金属星^[2] LP625-44($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.71$)并不是铅星.而 Aoki 等^[6]则在首次确定另一颗符合预言的贫金属星 LP706-7($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.74$)表面的铅元素丰度的同时,利用参数化热脉冲模型^[7]较好地重现了这颗星与 LP625-44 的表面丰度.由于任何恒星模型都涉及 ^{13}C 中子源产生机制的困难,我们为了避开这个困难并进一步探索约束铅星产生的基本物理条件,在不依赖于任何特定恒星模型的前提下,利用文献[7]的参数化热脉冲模型拟合了三颗铅星的表面丰度,结果表明,除标准模型预言的条件外,铅星的产生还要求满足两个条件——很大的

2002-07-15 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G20000774),中国科学院知识创新工程重大项目(KJ92-SW-N02)和国家自然科学基金(19835010;19973002;10175074)资助

1)文中均以 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 表示金属丰度, $[\text{Fe}/\text{H}] = \lg(\text{Fe}/\text{H}) - \lg(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}$. 其中下标 * 表示恒星, \odot 表示太阳

2)贫金属星指金属丰度低于太阳系($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$)的恒星

平均中子辐照量及较小的挖掘程度。

2 参数化热脉冲模型

在循环发生的热脉冲过程中,富氮中间壳层中以前经历过 s 过程的物质被从对流外包层进来的新鲜的铁种子核及氢燃烧壳层的灰烬稀释。同时,种子核接受中子辐照,通过 s 过程合成新的重核素。然后,约占中间壳层总物质质量(1-r)部分的物质被挖到恒星的外包层,余下的 r 部分则继续留在中间壳层中经历下一个脉冲。显然,在热脉冲机制下,核素最终的丰度与 4 个物理量有关。它们是每个脉冲的中子辐照量 $\Delta\tau$ 、脉冲重叠因子 r、发生 s 过程的必须温度 T_0 (以 10^9 K 为单位)及中子数密度 n_n 。这 4 个量不是完全独立的,其中 $\Delta\tau$, n_n 及 T_0 满足以下关系式:

$$\Delta\tau \equiv v_T n_n(t) \Delta t, \quad (1)$$

式中 $v_T = (2kT_0/m_n)^{1/2}$ 是平均中子热速度。通常,热脉冲模型还定义另一个物理量——平均中子辐照量 τ_0 。它与以上参量的关系如下:

$$\tau_0 = -\Delta\tau/\ln r. \quad (2)$$

在计算中把中子数密度 n_n 和温度 T_0 都取为常数,分别定为 ^{13}C 中子源对应的典型值 10^7cm^{-3} 及 0.1。应当指出,除了以上参数外,核素的丰度还与 s 过程的网络计算有关。

按照经典 s 过程理论(无分叉理论),慢中子俘获是沿着原子量 A 连续的路径进行的。对应原子量为 A 的核素丰度随时间的变化遵循以下的一组耦合方程:

$$dN_A/dt = \lambda_n(A-1)N_{A-1} - \lambda_n(A)N_A, \quad (3)$$

这里 $\lambda_n(A)$ 表示核素 A 的中子俘获率,它与中子数密度 n_n 、中子俘获截面 σ 及中子速度 v 的关系如下:

$$\lambda_n(A) = n_n \langle \sigma v \rangle. \quad (4)$$

$\langle \rangle$ 定义为对其中的物理量求平均。鉴于核素中子俘获的时标远大于其发生 β 衰变的时标,可以对方程(3)作变换,把核素丰度随时间的变化变成随中子辐照量的变化。

$$dN_A/d\tau = \sigma(A-1)_{\text{KT}} N_{A-1} - \sigma(A)_{\text{KT}} N_A. \quad (5)$$

其中 σ_{KT} 是 Maxwellian 平均中子俘获截面。在实际运算中,考虑到某些核素俘获中子的时标与其 β 衰变的时标相近,应同时计及这两个分支的贡献。因此,在考虑分支的情况下,方程(3)应改写为

$$\begin{aligned} \frac{dN(Z, A)}{d\tau} = & N(Z, A-1)\sigma(Z, A-1)_{\text{KT}} + \\ & N(Z-1, A) \frac{\lambda_\beta(Z-1, A)}{n_n v_T} + \\ & N(Z+1, A) \frac{\lambda_{\text{ec}}(Z+1, A)}{n_n v_T} - \\ & N(Z, A) \left[\sigma(Z, A)_{\text{KT}} + \frac{\lambda_\beta(Z, A)}{n_n v_T} + \frac{\lambda_{\text{ec}}(Z, A)}{n_n v_T} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

等式右边的 λ_β 和 λ_{ec} 分别表示核素的 β 衰变率和电子俘获(或正电子发射)率。

为了找到观测数据的最佳拟合参数,先选定 $\Delta\tau$ 的值(在 n_n, v_T 确定的情况下, $\Delta\tau$ 的变化由中子辐照持续的时间 Δt 决定),然后通过变化 r 来寻找参数的最佳值。与此同时,采用以下公式测量计算结果与观测数据之间的误差:

$$\chi^2 = \sum \frac{(N_{\text{exp}} - N_{\text{cal}})^2}{(\Delta N_{\text{exp}})^2 (K - K_{\text{free}})}.$$

其中的 N_{exp} 和 N_{cal} 分别表示元素丰度的观测值和计算值; ΔN_{exp} 是观测误差; K 和 K_{free} 则分别表示观测元素的个数和变化的参量个数。

3 计算结果与讨论

由于产生贫金属星的星际介质中包含的物质主要来自于超新星爆发,即这些物质主要是快中子俘获过程(简称 r(rapid)过程)的产物。因此参照文献[5]的做法,以 1999 年 Arlandini 等^[8] 给出的 r 过程产量作为恒星初始丰度的基础。对于金属丰度分别为 -1.65 和 -1.7 的两颗铅星 HD187861 和 HD224959,取其折算到 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6$ 时的值。而对于另一颗铅星 HD196944,则取其折算到 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.4$ 的值。核素的中子俘获截面取最新的编评数据^[9]。其他参数的选取及拟合误差 χ^2 如表 1 所示,相应的拟合结果见图 1。

表 1 模型参数

	HD187861 [Fe/H] = -1.65	HD224959 [Fe/H] = -1.7	HD196944 [Fe/H] = -2.45
r	0.575	0.575	0.625
$\Delta\tau/\text{mb}^{-1}$	0.71	1.03	0.61
τ_0/mb^{-1}	1.28	1.86	1.29
χ^2	0.31	0.41	1.83

为了比较分叉对拟合结果的影响,对不考虑分

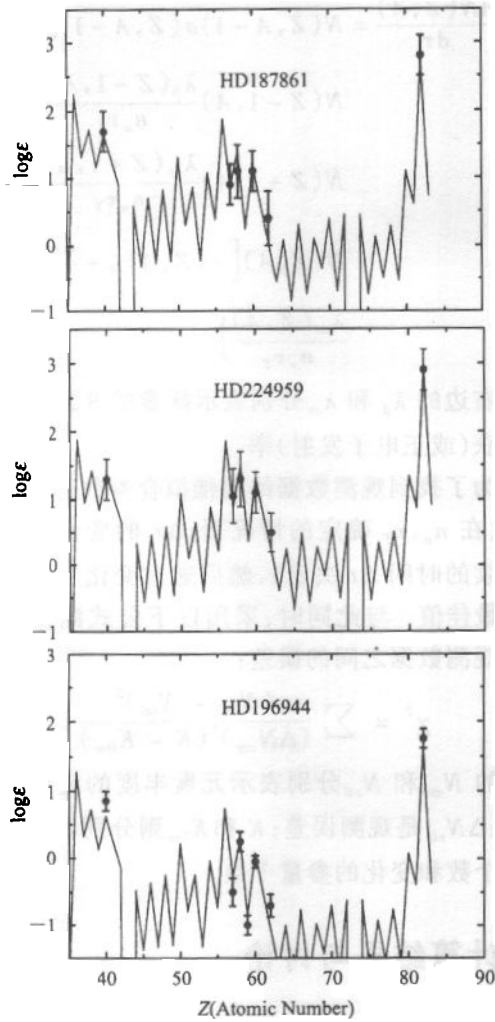


图 1 三颗铅星的最佳拟合结果

其中元素丰度对数 $\log \epsilon = \lg(N_i/N_H) + 12$, Z 是原子序数.

又的情况也作了拟合计算,发现分叉的影响非常小. 为此,在不考虑分叉的情况下,采用与文献[5]相近的参数,重新拟合了 LP625-44 和 LP706-7 的数据(文献[5]取 LP625-44 的 $\Delta\tau = 0.71\text{mb}^{-1}$, LP706-7 的 $\Delta\tau = 0.80\text{mb}^{-1}$,两者的 r 均为 0.1). 从计算结果来看,我们的拟合结果与文献[5]的差别不大. 这再次证明分叉对拟合结果没有太大影响. 表 2 列出了无分叉情况下所选的参数及拟合误差 χ^2 . 它们相应的拟合结果见图 2.

表 2 模型参数(无分叉)

	HD187861	HD224959	HD196944	LP625-44	LP706-7
$[\text{Fe}/\text{H}]$	-1.65	-1.7	-2.45	-2.71	-2.74
r	0.7	0.725	0.725	0.1	0.1
$\Delta\tau/\text{mb}^{-1}$	0.52	0.62	0.47	0.69	0.81
τ_0/mb^{-1}	1.46	1.90	1.46	0.30	0.35
χ^2	0.12	0.11	0.53	2.9	1.53

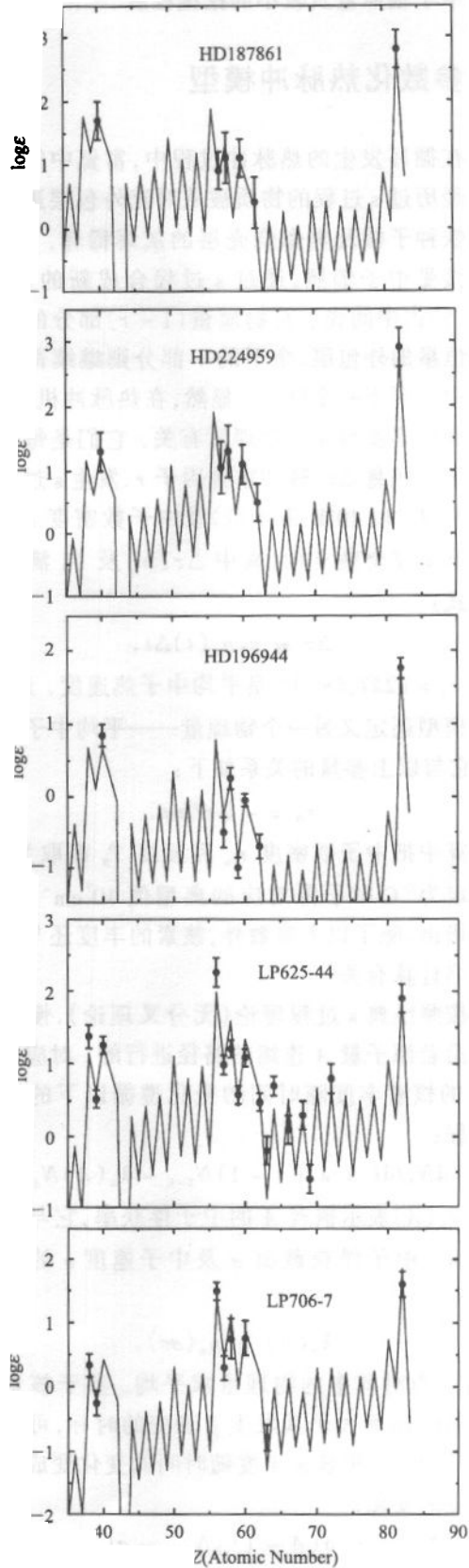


图 2 五颗贫金属星的最佳拟合结果(无分叉)

其中元素丰度对数 $\log \epsilon = \lg(N_i/N_H) + 12$,

Z 是原子序数.

由拟合计算结果可以得到以下结论:

(1) 分叉反应道对拟合结果影响不大. 不考虑分叉的拟合结果略优于考虑分叉的结果. 这很可能是由于金属丰度低的缘故. 低金属丰度可能不利于分叉反应道的打开, 从而导致这些道对最终结果的贡献很小. 另外, 也可能是因为分叉反应道只涉及少数不稳定核素, 虽然它对这些核素本身的丰度有较大的影响, 但反映到其对应的元素丰度, 只是使之产生微小的变动而已. 所以, 考虑分叉后, 虽然参数发生了变化, 但对拟合结果本身没有产生很大影响.

(2) 铅星的“第三次挖掘”的挖掘程度比非铅星的小, 它们富氦壳层中的大部分物质仍留在星体内部. 而对非铅星来说, 情况正好相反, 挖掘到表面的物质比留在壳层中的多. 这一点很容易从脉冲重叠因子 r 的取值看出: 三颗铅星的脉冲重叠因子 r 都大于 0.5, 而另两颗贫金属星的 r 则小于 0.5. 值得注意的是: 文中计算铅星所取的 r 值与标准恒星模型采用的 r 的取值范围 0.4—0.7 是相符的. 另外, 虽然三颗铅星的金属丰度不同, 但从脉冲重叠因子 r 的取值来看, 脉冲重叠因子 r 与恒星的金属丰度无关.

(3) 铅星的平均中子辐照量大于 1mb^{-1} , 明显大于非铅星的量. 事实上, 平均中子辐照量越大意味着种子核俘获中子的几率越大, 这必然越有利于形成重核素. 这显然解释了为什么铅星上铅元素的产量远大于较轻元素的产量.

(4) 参考文献[5]曾提到, 拟合结果对中子辐照量的取值是很敏感的. 我们对此作了类似计算. 在图3和图4中, 以 HD187861 无分叉的情况为例, 分别给出了拟合误差 χ^2 、元素丰度比 $\log(\text{Ce}/\text{Zr})$ 和 $\log(\text{Pb}/\text{Ce})$ 与脉冲重叠因子 r 和每个脉冲的中子辐照量 $\Delta\tau$ 的关系. 图中, 实线是计算结果, 两条虚线之间对应的是观测值的误差范围. 从图3不难看出: 第二峰特征元素 Ce 与第一峰特征元素 Zr 的丰度比和 Pb 与 Ce 的丰度比都随 r 的增加而单调递增, 只要 $r \geq 0.375$, Pb 与 Ce 的丰度比值就落在观测误差的范围内; 而 Ce 对 Zr 的丰度比在 r 的整个变化过程中基本保持不变, 其计算结果均在观测误差之内. 显然, 在合理的误差范围内, r 有较宽的取值范围. 另一方面, 从图4看, 在 $0.35\text{mb}^{-1} < \Delta\tau < 0.63\text{mb}^{-1}$ 的范围内, $\log(\text{Pb}/\text{Ce})$ 和 $\log(\text{Ce}/\text{Zr})$ 的计算结果都能符合观测值, 而且二者的变化趋势正好相反: 随着 $\Delta\tau$ 的增大, $\log(\text{Pb}/\text{Ce})$ 先增加后下降, 而 $\log(\text{Ce}/\text{Zr})$ 则是先下降后增加; 在拟合误差达到最佳

值附近时, 前者达到最大值, 而后者则达到最小值. 相应地, 对应拟合误差的最佳值, $\Delta\tau$ 的取值范围仍有一定宽度. 总之, 从本文的计算看, 无论是否考虑分叉, 三颗铅星的拟合结果对中子辐照量和脉冲重叠因子都是不敏感的. 究其原因, 可能是因为这三颗星的观测数据相对另两颗星要少且观测误差较大所致.

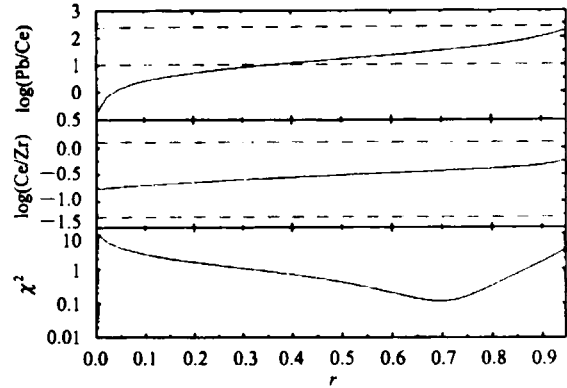


图3 $\log(\text{Pb}/\text{Ce})$, $\log(\text{Ce}/\text{Zr})$ 和 χ^2 与 r 的关系

(5) 与文献[5]相同, 3个脉冲后, 恒星的最终丰度基本不变. 模型本身对中子数密度不敏感, 因为与计算直接相关的是中子数密度与中子辐照持续时间的乘积, 在中子辐照量一定的情况下, 中子密度可以有较宽的取值范围. 此外, 计算结果不依赖于初始丰度. 只要种子核的量确定, 各核素的最终丰度就确定. 这是因为 s 过程导致各核素的最终产量远远超丰于其初始产量所致.

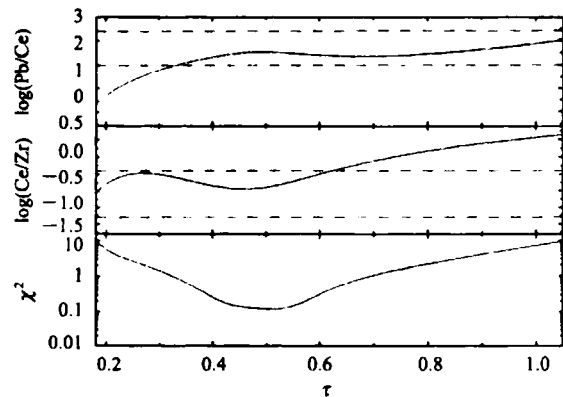


图4 $\log(\text{Pb}/\text{Ce})$, $\log(\text{Ce}/\text{Zr})$ 和 χ^2 与 $\Delta\tau$ 的关系

4 小结

在不依赖于任何特定恒星模型的前提下, 利用参数化热脉冲模型很好地重现了三颗铅星的表面丰度. 通过与另两颗非铅星的计算结果作比较, 发现

必须对标准恒星模型预言的铅星产生条件加以约束,即铅星的平均中子辐照量很大且其“第三次挖掘”的程度较小.此外,在参数化热脉冲模型下,探讨了 s 过程分叉反应道对结果的影响,得到了贫金属情况可能不利于分叉反应道打开的结论.另外,值得一提的是:虽然铅星的金属丰度与非铅星的不

同,但由于目前观测的恒星数日过少,还不能确定铅星适用的金属丰度范围就是 $-2.45 < [Fe/H] < -1.3$.

总之,虽然参数化脉冲模型过于简单,但通过它仍得到了一些非常有用的结论,这对完善恒星模型无疑是有益的.

参考文献 (References)

- Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A et al. *Rev. Mod. Phys.*, 1957, **29**:547—650
- LI Guang-Lie, LI Long. *Nuclear Physics Review*, 1999, **16**:201—206 (in Chinese)
(厉光烈,李龙. *原子核物理评论*, 1999, **16**:201—206)
- ZHANG Miao-Jing, ZHANG Bo, LI Guang-Lie. *Nuclear Physics Review*, 2002, **19**:321—328 (in Chinese)
(张妙静,张波,厉光烈. *原子核物理评论*, 2002, **19**:321—328)
- Gallino R, Arlandini C, Busso M et al. *Ap. J.*, 1998, **497**:388—403
- Van Eck S, Goriely S, Jorissen A et al. *Nature*, 2001, **412**:793—795
- Aoki W, Ryan S G, Norris J E et al. *Ap. J.*, 2001, **561**:346—363
- Howard W M, Mathews G J, Takahashi K et al. *Ap. J.*, 1986, **309**:633—652
- Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K et al. *Ap. J.*, 1999, **525**:886—900
- BAO Z Y, Beer H, Käppeler F et al. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2000, **76**:70—154

Abundances of Metal-Poor Stars and Slow Neutron-Capture Progress*

ZHANG Miao-Jing^{1,2,4} ZHANG Bo^{1,3,4} LIU Ji-Hong^{3,4} LI Guang-Lie^{1,4}

1(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

2(Department of Physics and Electronic Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

3(Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

4(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract We apply the parametric model to fit the surface abundances of three lead-rich stars (HD187861, HD196944 and HD224959) without adopting any specific stellar model. It shows that the calculated result can fit the observed data well whether the reaction branchings are taken into account or not. Besides, by the comparison of the model parameters of the three lead-rich stars with those of two very metal-poor stars (LP625-44 and LP706-7), we find out that the average neutron exposure of the former is larger than that of the latter, but the dredge-up extent is smaller. We come to the conclusion that the parametric model is significant of constraints on the stellar model, though it is very simple.

Key words metal-poor star, lead-rich star, s-progress, neutron exposure

Received 15 July 2002

* Supported by Major State Basic Development Program (G20000774), CAS Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02) and NSFC (19835010, 19973002, 10175074)